



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

EETU VUORINEN  
KARKEAMALLINNUS KONEJÄRJESTELMIEN SUUNNITTELUSSA

Kandidaatintyö

Tarkastaja: professori Asko Ellman  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
11. tammikuuta 2017

# TIIVISTELMÄ

**EETU VUORINEN:** Karkeamallinnus konejärjestelmien suunnittelussa

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 32 sivua

Joulukuu 2018

Konetekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Kone- ja tuotantotekniikka

Tarkastaja: professori Asko Ellman

Avainsanat: kandidaatintyö, mallintaminen, tarkkuus, matemaattinen mallintaminen, matala tarkkuus

Työn tarkoitus on tarkastella matemaattista mallintamista eri tilanteissa, eri lähestymistavoin. Työssä selvitetään mitä karkeamallintaminen voi olla, milloin karkean tarkkuuden malleja kannattaa käyttää ja mihin niiden hyöty perustuu. Eri materiaalien tarkastelun avulla karkeamallinnusta on avattu perusteista lähtien. Asiaa on tutkittu matematiikan ja suunnitteluprosessin näkökulmista. Jokainen tarkasteltu teksti käsitellään erikseen ja niiden tulokset avataan lopun yhteenvedossa.

Työssä käytetyt tutkimustulokset on kerätty internetissä julkaistuista tutkimuksista ja muista materiaaleista.

## **ABSTRACT**

**EETU VUORINEN:** Low-fidelity modelling in machine design

Tampere University of Technology

Bachelor's Thesis, 32 pages

December 2018

Bachelor's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Mechanical Engineering

Examiner: Professor Asko Ellman

Keywords: thesis, modelling, low-fidelity, fidelity, mathematical modelling

## **ALKUSANAT**

Heuristiikka on kognitiivisen psykologian määrittelemä epäformaali menetelmä ongelmanratkaisuun. Kiitos äiti.

Tampereella, 3.12.2018

Eetu Vuorinen

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	SUUNNITTELUANALYYSI .....	2
2.1	Muuttujien suhteiden vertailu.....	2
2.2	Järjestelmän ominaisuudet .....	4
2.3	Suunnitteluanalyysi.....	4
2.3.1	Aksiomaattinen suunnittelu .....	5
2.3.2	Herkkyysanalyysi.....	6
2.3.3	Järjestelmän ominaisuuksien riippuvaisuudet .....	8
2.3.4	Mallin vahvuus .....	9
2.4	Konseptin luominen.....	9
2.4.1	Laatikkomalli .....	9
2.4.2	Function means tree (FMT).....	10
2.5	Vikapuuanalyysi (FTA) .....	12
3.	ANALYSIS AND OPTIMIZATION TOOL FOR ENGINEERING DESIGN .....	14
3.1	Suunnitteluprosessi .....	14
3.2	Käyttöliittymä.....	15
3.3	Suunnitteluanalyysin funktiot .....	16
3.4	Optimointi .....	17
3.5	Käytännön tapaus .....	18
4.	COMPARISON OF LOW AND HIGH FIDELITY APPROACH IN MODEL BASED DESIGN IN THE CASE OF A PORTABLE MOTION PLATFORM .....	20
4.1	Siirrettävä liikealusta .....	20
4.1.1	Korkean tarkkuuden malli .....	21
4.1.2	Karkeamalli .....	22
4.2	Vertailu .....	22
5.	ON THE COST OF LOW-FIDELITY MODELLING.....	24
5.1	Lähestymistapa .....	24
5.2	Verkoston luotettavuuden case-tutkimus .....	25
6.	A MULTI-FIDELITY MODELLING APPROACH FOR EVOLUTION AND OPTIMIZATION OF WING STROKE AERODYNAMICS IN FLAPPING FLIGHT .....	27
6.1	Mallintaminen .....	27
6.1.1	BE-malli .....	27
6.1.2	NS-malli .....	28
6.2	Optimointi .....	28
6.3	Laskenta .....	29
7.	YHTEENVETO.....	31
	LÄHTEET .....	33

# 1. JOHDANTO

Nykyajan insinöörityö nojaa voimakkaasti erilaisiin matemaattisiin malleihin ja simulaatioihin, joiden avulla voidaan ennakoida prosessien kulkua tai valmiin tuotteen toimintaa. Koska insinöörityö on kallista ja korkean tarkkuuden mallien (high-fidelity models) rakentaminen aikaavievää, on loogista tutkia sopivaa ajan ja mallin tarkkuuden suhdetta.

Karkean tarkkuuden malleja (low-fidelity modelling) on käytetty mallinnuksessa aina. Tietokoneiden laskunopeuden kasvaessa karkeamallintamisen käyttö lopullisen tuotteen suunnittelussa voi kuulostaa vanhanaikaiselta, mutta suunnitteluprosessin varhaisissa vaiheissa karkeamallinnuksesta saattaa olla huomattavaa hyötyä.

Tämän kandidaatintyön tarkoitus on selventää karkeamallintamisen ominaisuuksia ja hyötyjä, sekä kartoittaa sille mahdollisia käyttökohteita. Työn perustana on käytetty erilaisia tutkimuksia, diplomitöitä sekä artikkeleita, jotka sivuavat, käsittelevät tai hyödynnevät karkeamallintamista. Jokaisesta tekstistä on poimittu keskeiset karkeamallinnukseen liittyvät asiat. Osa teksteistä ei käsittele pääasiallisesti mallintamista tai sen tarkkuutta, vaan kyseisten artikkelien tarkoitus on selvittää jotakin muuta, mutta näissä artikkeleissa hyödynnetään karkeamallinnusta siinä määrin, että kirjoituksiin kannattaa hyvinkin paneutua. Työ on tehty kirjallisuusselvityksenä. Jokainen teksti on käsitelty omassa luvussaan ja yhteenvedossa tekstien ansiot ja tutkimuksen lopputulos on selvennetty.

## 2. SUUNNITTELUANALYYSI

Tässä luvussa perehdytään Petter Krusin (2010) kirjoittamaan Linköpingin yliopiston tuotekehityksen kurssin oppimateriaaliin. Teksti käsittelee mallintamisen ja kannattavuuden suhdetta sekä karkean tarkkuuden matemaattista mallintamista. Kurssimateriaali toimii pohjana muihinkin tässä työssä käsiteltäviin teksteihin. Aineisto esittelee erilaisia matemaattisia keinoja ja työkaluja tärkeimpien muuttujien löytämiseen. Tärkeimpinä muuttujina Krus pitää systeemin muuttujia, joiden vaikutukset valmiissa tuotteessa ovat muita muuttujia merkittävämpiä. Tuotteen pitää olla sekä kaupallisesti että teknisesti toimiva, jotta se olisi tuottava.

Tekstissä Krus määrittää suunnitteluprosessin matemaattisesti kaavan (1) mukaan:

$$y = f(x). \quad (1)$$

Kaavassa (1)  $y$  kuvaa tuotteelle asetettuja vaatimuksia ja  $f$  funktiota, jonka avulla vaatimukset saavutetaan lähtöarvoilla  $x$ . Tämä yksinkertaistettu tilanne toimii, jos funktio  $f$  on lineaarinen, epälineaarinen funktio ratkaistaisiin iteroimalla. Yleisessä tapauksessa  $x$  tarkoittaa kaikkea tuotetta kuvaavaa dataa, systeemin muuttujia. Monimutkaisemmissa tilanteissa systeemin muuttujien,  $x$ , lukumäärä on niin suuri, että niiden ja vaatimuksien,  $y$ , välisten yhteyksien määrittäminen on matemaattisesti monimutkaista. Tällaisissa tilanteissa tärkeimpien muuttujien ja niiden välisten yhteyksien selvittäminen on ensisijaisen tärkeää.

### 2.1 Muuttujien suhteiden vertailu

Muuttujien, vaatimusten tai muuttujien ja vaatimusten väliset yhteydet on helppo selvittää vertailumatriisien avulla. Asiakkaan vaatimukset voivat olla teknisiä tai aineettomia kokonaisuuksia. Tuotteen suunnitteluun sisältyy aina vaatimusten välisiä kompromisseja. Näiden kompromissien avulla pyritään luomaan tuote, jonka painotus on halutulla muuttujalla. Toimivana työkaluna vaatimusten välisten suhteiden selvittämiseen voidaan käyttää kuvan 1 mukaisia vertailumatriiseja.

	Hupi	Käytännöllisyys	Ympäristöystävällisyys	Turvallisuus	Taloudellisuus	Kompensaatioluku	Tärkeys	Normalisoitu arvo
Hupi	0	2	0	2	2	0	6	1,50
Käytännöllisyys	0	-2	0	1	1	2	2	0,50
Ympäristöystävällisyys	2	2	0	2	2	4	8	2,00
Turvallisuus	0	1	0	-5	1	6	2	0,50
Taloudellisuus	0	1	0	1	-6	8	2	0,50

**Kuva 1.** Asiakkaan vaatimusten välinen vertailumatriisi, muokattu lähteestä (Krus 2010, s. 17).

Yllä esitellyssä matriisissa vaatimusten merkittävyydelle on annettu arvo 0, 1 tai 2. Yläkolmion alkion arvo on 2, jos pystyakselin muuttujaa on vaaka-akselin muuttujaa merkittävämpi, 1 kun muuttujat katsotaan yhtä merkittäviksi ja 0 vaaka-akselin muuttujan ollessa merkittävämpi. Yläkolmion arvot on heijastettu käänteisinä matriisin alakolmioon. Jokaisen rivin summa, ilman diagonaalialkiota, kuvaa rivin muuttujan tärkeyttä ja on merkitty matriisin oikealle puolelle toiseen sarakkeeseen.

Matriisin oikealla puolella olevan ensimmäisen sarakkeen arvon tarkoitus on kompensoida alkiodien jakautumista alkioarvon 1 ympärille 0:n sijaan. Tämä kompensatioluku lasketaan kertomalla rivinumeron kahdella. Matriisin diagonaalialkiot ovat yläkolmion sarakkeiden summien vastalukuja. Yläkolmion rivin, rivin diagonaalialkion ja rivin kompensatioluvun summalla voidaan laskea rivin muuttujan tärkeys. Arvo saadaan myös laskemalla rivin summa ilman diagonaalialkioita. Usein muuttujan tärkeys normalisoidaan tulkinnan helpottamiseksi. Normalisoitu tulos näkyy matriisin oikealla puolella viimeisessä sarakkeessa.

Huomionarvoista edellä mainitussa vertailutyökalussa on arvojen merkityksellisyys, koska tärkeyttä kuvaavan arvon suuruus on verrattavissa ainoastaan muihin matriisin arvoihin. Matriisin tarkoitus on muuttujien tärkeysjärjestyksen selkeyttäminen. Tällainen vertailu voi toisinaan johtaa jonkin parametrin tärkeydeksi arvon 0, mikä ei ole suotavaa, sillä vertailujen muuttujien tulisi olla merkittäviä, jotta vertailu tuottaisi toivottavaa hyötyä.

Jos asiakkaan vaatimusten lukumäärä,  $N$ , on korkea, edellä mainittua vertailutyökalua täytyy muokata. Matriisiin käytettävien muuttujien lukumäärä saadaan kaavalla (2)

$$n_{comp} = \frac{N^2 - N}{2}. \quad (2)$$



Kaavassa (2)  $n_{comp}$  kuvaa käytettävien muuttujien sopivaa määrää. Tarkoituksena on jakaa yksittäiset muuttujat ryhmiin ja laskea ryhmille painoarvo. Ryhmien alkioilla, eli alkuperäisillä vaatimuksilla, on omat painoarvonsa. Ryhmä voi olla esimerkiksi tuotteen käytettävyyden, joka sisältää tuotteen koon, käyttäjäystävällisyyden ja helppokäyttöisyyden. Lopuksi kuvan 1 mukainen matriisi luodaan edellä mainittujen ryhmien pohjalta.

## 2.2 Järjestelmän ominaisuudet

Järjestelmän ominaisuudet voivat olla ensisijaisia tai toissijaisia. Ensisijaiset järjestelmän ominaisuudet ovat tavoitevaatimuksia, esimerkiksi nopeus, kulutus tai tehokkuus. Toissijaiset tulevat ensisijaisten sivutuotteena, esimerkiksi paino, tilavuus ja hinta. Ne voidaan laskea suoraan ensisijaisten ominaisuuksien avulla, esimerkiksi suurempi kulutus nostaa koneen painoa. Näiden ominaisuuksien suhteita voidaan hyödyntää tuotteen suunnittelussa. Karkeamallinnuksessa ensisijaisuuksien tunnistaminen on keskeistä.

Mallin valinnassa Krus noudattaa Occamin partaveistä eli säästäväisyyden periaatetta (*Occam's razor*). Käytännössä tällä pyritään mahdollisimman yksinkertaisiin malleihin sekä ensi- että toissijaisilla järjestelmän ominaisuuksilla. Tällaiset mallit voivat perustua mitattuun dataan tai vastaaviin jo olemassa oleviin tuotteisiin.

Tekstissään Krus johtaa allometriset mallit sähkö- ja hydraulimoottoreille. Allometrisella mallilla tarkoitetaan ensi- ja toissijaisten järjestelmän ominaisuuksien välisiä yhteyksiä. Kummassakin tapauksessa selvitetään yhteys massan, tehon ja väännön välillä sekä tilavuuden, tehon ja väännön välillä. Näissä malleissa teho ja vääntö ovat ensisijaisia järjestelmän ominaisuuksia, joille voidaan antaa alkuarvot ja tällä tavoin selvittää toissijaisten, massan ja tilavuuden, keskinäinen riippuvuus järjestelmän ensisijaisiin ominaisuuksiin.

Allometrisia malleja on suositeltavaa käyttää esimerkiksi moottoreiden ja vaihdelaatikoiden mallintamiseen. Vaikka näiden mallien tarkkuus on kyseenalainen, niitä voidaan käyttää suunnitteluprosessin alussa, suunnitelman analysointiin ja poistamaan epäolennaisia konsepteja. Allometrisia malleja voidaan käyttää myös tuotteen optimointiin. Suunnitteluprosessin alussa on kuitenkin tärkeintä koota riittävästi dataa tuotteen muuttujista ja asiakkaan vaatimuksista.

## 2.3 Suunnitteluanalyysi

Suunnitteluanalyysin tavoitteena on saada tietoa valitusta ratkaisusta ja siitä miten sitä muokkaamalla asiakkaan vaatimukset voidaan saavuttaa. Suunnitteluanalyysiä varten Krus esittelee erilaisia matriiseja, joiden avulla järjestelmän muuttujia, vaatimuksia, parametreja ja näiden välisiä suhteita voidaan tarkastella. Joissain tapauksissa järjestelmän ominaisuuksien ja parametrien ero on epäselvä.

### 2.3.1 Aksiomaattinen suunnittelu

Aksiomaattinen suunnittelu perustuu matriisiin, joka kuvaa suunnitteluparametrien ja järjestelmän ominaisuuksien välistä yhteyttä. Siihen kuuluu kaksi aksiomaa: itsenäisyysaksioma ja yksinkertaisuusaksioma.

Ensimmäisessä aksiomassa todetaan yksinkertaisimman matriisin olevan paras. Tässä tapauksessa jokainen suunnitteluparametri vaikuttaa yhteen järjestelmän ominaisuuteen. Huonoimmassa tapauksessa useampi järjestelmän ominaisuus riippuu useasta suunnitteluparametrilla. Parhaan ja huonoimman tapauksen välissä on tilanne, jossa aksiomaattinen matriisi voidaan kuvata alakolmiomatriisilla. Tällöin vähintään yksi järjestelmän ominaisuus on kuvattavissa yhdellä parametrilla. Hyvänä esimerkkinä tekstissä esitellään lentokoneen aksiomaattista matriisia, jossa järjestelmän ominaisuudet, noste ja työntövoima, kuvautuvat kumpikin erikseen alla olevan kaavan (3) mukaisesti

$$\begin{pmatrix} \text{Noste} \\ \text{Työntövoima} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{Stipi} \\ \text{Moottori} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Esimerkiksi helikopterin kuvaaminen vastaavalla tavalla on monimutkaisempaa, sillä kopterin moottori tuottaa sekä työntövoimaa että nostetta.

Toinen aksioma kuvaa malliin tarvittavaa dataa. Tarkoitus on tehdä mahdollisimman toimiva malli mahdollisimman pienellä tietomäärällä, yleensä tässäkin tapauksessa yksinkertaisin malli on paras. Aksioma perustuu informaatioteoriaan ja sen tarkka määritelmä selitetään häiriönsietokyvyn avulla.

Komponenttien tärkeys voidaan laskea kuvan 1 tapaan. Alla olevan herkkyyismatriisin sarakkeissa on komponentteja tai järjestelmäparametreja, toisin kuin edellisessä matriisissa, jossa kuvattiin ainoastaan järjestelmän muuttujien riippuvaisuuksia.

	Järjestelmän komponentit/parametrit				
Järjestelmän ominaisuudet	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Järjestelmän ominaisuuksien tärkeys
SC <sub>1</sub>	k <sub>11</sub>	k <sub>12</sub>	k <sub>13</sub>	k <sub>14</sub>	SCP <sub>1</sub>
SC <sub>2</sub>	k <sub>21</sub>	k <sub>22</sub>	k <sub>23</sub>	k <sub>24</sub>	SCP <sub>2</sub>
SC <sub>3</sub>	k <sub>31</sub>	k <sub>32</sub>	k <sub>33</sub>	k <sub>34</sub>	SCP <sub>3</sub>
SC <sub>4</sub>	k <sub>41</sub>	k <sub>42</sub>	k <sub>43</sub>	k <sub>44</sub>	SCP <sub>4</sub>
Komponenttien tärkeys	XP <sub>1</sub>	XP <sub>2</sub>	XP <sub>3</sub>	XP <sub>4</sub>	

**Kuva 2.** Komponenttien ja järjestelmän ominaisuuksien välinen suunnittelumatriisi, muokattu lähteestä (Krus 2010, s. 71).

Kuvasta 2 nähdään, miten suunnittelumatriisi kootaan järjestelmän ominaisuuksien ja parametrien välille. Matriisin avulla voidaan helposti laskea ja vertailla kunkin ominaisuus-

den ja parametrin tärkeyttä systeemille: mitä tärkeämpi parametri tai ominaisuus sitä suurempi vaikutus sen muutoksella on koko systeemiin. Parametrien tärkeydelle voidaan laskea arvo alla olevalla kaavalla (4)

$$\mathbf{x}p = \mathbf{k}^t \mathbf{scp}. \quad (4)$$

Kaavassa (4)  $\mathbf{x}p$  kuvaa parametrin tärkeyttä,  $\mathbf{k}$  herkkyysmatriisia ja  $\mathbf{scp}$  järjestelmän ominaisuuksien tärkeyttä.

### 2.3.2 Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysi on erinomainen työkalu järjestelmän ominaisuuksien ja parametrien välisten suhteiden tutkimiseen. Sen avulla nähdään helposti mitkä tuotteen ominaisuudet ovat tärkeimpiä asiakkaan vaatimusten saavuttamiseksi. Herkkyysanalyysi on ensisijainen työkalu systeemin vahvuuden arvioimiseksi. Tässä vahvuudella tarkoitetaan systeemin kykyä vastustaa siihen liittyviä häiriöitä.

Kaava (1) oletetaan epälineaariseksi, sen linearisointi nimellisarvon ympärillä voidaan johtaa kaavaan (5)

$$\mathbf{y}_0 + \Delta \mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0) + \mathbf{J} \Delta \mathbf{x}. \quad (5)$$

Yllä olevassa kaavassa (5)  $\mathbf{J}$  on herkkyysmatriisi. Se lasketaan derivoimalla jokainen avaruuden  $\mathbf{y}$  muuttuja avaruuden  $\mathbf{x}$  muuttujalla, kaavan (6) mukaisesti

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i(\mathbf{x})}{\partial x_j} = \mathbf{k}_{ij} = \frac{\partial y_i}{\partial x_j}. \quad (6)$$

Kaavoissa (5) ja (6)  $\mathbf{y}$  kuvaa järjestelmän ominaisuuksia ja  $\mathbf{x}$  järjestelmän parametreja. herkkyysmatriisin avulla näiden muutosten välinen yhteys on helppo selvittää.

Parametrien arvot tulee normalisoida, jos systeemi on monimutkainen ja sen herkkyysmatriisi suuri. Tämä tehdään koska parametrien arvot voivat varioida merkittävästi suuruudeltaan. Normalisointia varten tulee laskea parametrien ja järjestelmän ominaisuuksien välistä suhdetta kuvaava dimensioton arvo, joka kertoo, kuinka monta prosenttia järjestelmän ominaisuus muuttuu, kun järjestelmäparametria muutetaan yksi prosentti. Tämä lasketaan kaavalla (7)

$$\mathbf{k}_{ij} = \frac{x_j}{y_i} \frac{\partial y_i}{\partial x_j}. \quad (7)$$

Relatiivisessa herkkyysmatriisissa rivin alkioiden summa on yksi, tämä helpottaa tärkeimpien muuttujien tunnistamisessa. Relatiivisen herkkyysmatriisin kaava (8) on esitelty alla

$$\mathbf{k}_{ij} = \frac{x_j \frac{\partial y_i}{\partial x_j}}{\sum_{i=1}^N \left| x_i \frac{\partial y_i}{\partial x_j} \right|}. \quad (8)$$

Kaavassa (8)  $N$  kuvaa järjestelmän ominaisuuksien lukumäärää.

Toni Arolan (2018) kirjoittamassa diplomityössä, Meluntorjunta ratkaisun parametrinen suunnittelumalli, on selvitetty eri materiaalien vaikutus äänenvoimakkuuteen. Diplomitöystä huomataan optimoinnin vaikutus herkkyyismatriisiin. Työn optimointi on tehty iteroimalla ja huomataan herkkyyismatriisin muuttuvan iterointikierrosten välillä. Arolan hyödyntämää suunnitteluanalyysityökalua on esitelty tämän kandidaatintyön luvussa 3, vaikka työkalun optimointiominaisuutta on hyödynnetty melko vähän, on kirjoittajan mielestä työkalun herkkyyismatriisista selkeää hyötyä.

		B	Cr	Ct	tc	T	W1	Wf
	Arvot	2.16E+01	3.65E+00	1.55E+00	3.10E-02	1.73E+03	2.64E+04	2.22E+03
R	1.00E+06	-2.44E+04	-1.16E+05	-1.14E+05	-1.50E+06	-4.10E-02	-4.00E+00	4.64E+02
SLo	1.00E+03	-1.13E+02	5.49E+01	-2.99E+01	8.87E+01	-1.46E+00	1.21E-01	1.21E-01
SL	4.83E+02	-5.07E-01	-1.71E+02	-1.46E+02	-5.70E+01	-1.17E-05	1.68E-02	1.68E-02
W0r	2.86E+04	6.66E-02	-2.67E+00	-3.48E-02	3.89E+01	-3.79E-05	4.70E-01	1.47E+00
Vs	3.57E+01	-8.25E-01	-3.40E+00	-3.43E+00	-1.57E-01	-3.46E-06	6.18E-04	6.14E-04
VLo	2.17E+01	-5.01E-01	-2.07E+00	-2.08E+00	-3.93E-02	-7.19E-07	3.77E-04	3.74E-04
VL	1.83E+01	-4.23E-01	-1.75E+00	-1.76E+00	-5.91E-02	-1.12E-06	3.17E-04	3.16E-04

	B	Cr	Ct	tc	T	W1	Wf
R	-0,53	-0,42	-0,18	-0,05	0	-0,11	1,03
SLo	-2,44	0,2	-0,05	0	-2,52	3,2	0,27
SL	-0,02	-1,29	-0,47	0	0	0,92	0,08
W0r	0	0	0	0	0	0,43	0,11
Vs	-0,5	-0,35	-0,15	0	0	0,46	0,04
VLo	-0,5	-0,35	-0,15	0	0	0,46	0,04
VL	-0,5	-0,35	-0,15	0	0	0,46	0,04

	Siipi				Työntövoima	Rakenne	P.aine
	B	Cr	Ct	tc	T	W1	Wf
R	-0,23	-0,18	-0,08	-0,02	0	-0,05	0,45
SLo	-0,28	0,02	-0,01	0	-0,29	0,37	0,03
SL	-0,01	-0,46	-0,17	0	0	0,33	0,03
W0r	0	0	0	0	0	0,79	0,21
Vs	-0,33	-0,23	-0,1	0	0	0,31	0,03
VLo	-0,33	-0,23	-0,1	0	0	0,31	0,03
VL	-0,33	-0,23	-0,1	0	0	0,31	0,03

**Kuva 3.** Ylimpänä tavallinen, keskellä normalisoitu ja alimpana suhteellinen herkkyyismatriisi, muokattu lähteestä (Krus 2010, s. 68-69).

Yllä olevasta kuvasta huomataan miten paljon yksinkertaisempi ja helppolukuisempi suhteellinen herkkyyismatriisi on tavalliseen herkkyyismatriisiin verrattuna. Jos parametrien lukumäärä kasvaa merkittävästi, matriisien tulkitseminen vaikeutuu. Tällaisissa tapauksissa parametreja on mahdollista yhdistellä ryhmiä. Esimerkiksi yllä olevissa matriiseissa siiven muuttujat voidaan ryhmittää yhdeksi parametriksi. Ryhmän herkkyyys voi olla riippumaton siihen vaikuttavien parametrien määrästä. Ryhmään valittujen parametrien tulee vaikuttaa samaan osakokonaisuuteen. Yhdistelty suunnittelumatriisi on erinomainen työkalu järjestelmän ominaisuuksien ja parametrien tasapainottamiseen. Tällaista matriisia voidaan käyttää koko suunnitteluprosessin ajan, vaikka malliin lisättäisiin uusia parametreja, ne vaikuttavat ainoastaan jo valittuihin ryhmiin, jotka taas näkyvät lopullisessa suunnittelumatriisissa.

Herkkyysmatriisiin avulla koko systeemi pysyy yksinkertaisena. Tarkemmat yksityiskohdat löytyvät matriisiin alemmilta tasoilta, eli komponenttien omista herkkyysmatriiseista. Näiden matriisien avulla vaatimusten tarkkailu on helppoa ja ongelmakohtien paikantaminen nopeaa.

### 2.3.3 Järjestelmän ominaisuuksien riippuvaisuudet

Eri järjestelmän ominaisuudet voivat olla ristiriidassa keskenään tai ne voivat vaikuttaa toisiinsa positiivisesti. Vaatimusten kartoittamisessa on hyödyllistä tietää järjestelmän ominaisuuksien suhteet, jotta voidaan parantaa jotakin ominaisuutta heikentämättä toista. Järjestelmän ominaisuuksien riippuvuuksia tutkimalla on mahdollista huomata mitkä suunnitelman osat ovat uhrattavissa, jotta toiset kehittyisivät. Järjestelmän ominaisuuksien riippuvuuksia kuvaavat arvot lasketaan kaavalla (9)

$$SCD_{ik} = \sum_{j=1}^m k_{ij}^0 k_{kj}^0. \quad (9)$$

Kaavassa (9),  $m$  on järjestelmän ominaisuuksien määrä. Järjestelmän ominaisuuksien riippuvuusmatriisi, **SCD** (*System Characteristic Dependencies*), on aina symmetrinen. Sen diagonaalialkioiden arvot kuvaavat kuinka herkkiä kyseiset ominaisuudet ovat suunnitteluparametreihin nähden. Selkeyden vuoksi SCD:n rivialkiot voidaan normalisoida diagonaalialkioiden suhteen. Matriisin alkiot voidaan kertoa muuttujalla  $\phi$ , joka on -1, jos ominaisuuden haluttu arvo on pienempi kuin nykyinen arvo ja 1 jos ominaisuuden nykyistä arvoa halutaan kasvattaa. Normalisoitu riippuvuusmatriisi, **ASCD**, on aina asymmetrinen. Yhdessä QFD-matriisin (*Quality function deployment*) kanssa SCD muodostaa *Laadun talon*, suunnittelutyökalun joka integroi asiakkaan vaatimukset suunnittelu- ja kehityssykliin (Kurian & Books24x7 2014). Sitä hyödynnetään laatujohtamisessa ja tuotteen tai palvelun kehittämisessä.

Vaihtoehtoinen järjestelmän ominaisuuksia arvioiva matriisi **SCC** (*System Characteristics Correlation*) perustuu herkkyysmatriisin sarakkeiden vastaavuussuhteisiin

$$SCC_{ik} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{ij}^0 k_{kj}^0}{s_i s_k}. \quad (10)$$

Yllä olevan kaavan (10) muuttuja  $s$  kuvaa herkkyysien poikkeamaa, sen arvo voidaan laskea kaavalla (11)

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (k_{ij}^0)^2}. \quad (11)$$

SCC-matriisin sarakkeet ajatellaan vektoreina ja niiden välinen kulma kuvaa järjestelmän ominaisuuksien korrelaatioita. Myös tämä matriisi voidaan normalisoida tulosten selkeyttämiseksi.

### 2.3.4 Mallin vahvuus

Suunnitteluparametrien lisäksi, on olemassa parametreja, jotka kuvaavat mallin epävarmuutta. Nämä parametrit voivat olla episteemisiä, vakioita joiden tarkkoja arvoja ei tunneta, tai sattumanvaraisia, ulkoisia tekijöitä esimerkiksi lämpötila tai ilmankosteus. Mallin epävarmuuksia voidaan yleisesti käsitellä kuin parametrien epävarmuuksia.

Mallin epävarmuudelle voidaan luoda kuvan 3 kaltainen herkkyysmatriisi, mutta suunnitteluparametrien ja järjestelmän ominaisuuksien suhteiden tilalla käytetään komponenttien epävarmuuslukuja. Hyvä malli on herkempi suunnitteluparametrien kuin epävarmuustekijöiden muutoksille. Tärkeää informaatiota tuotteen herkimmistä komponenteista saadaan kuitenkin paremmin epävarmuusmatriisin avulla.

Yksi lähestymistapa on tutkia parametrien epävarmuuksien vaikutusta järjestelmän ominaisuuksien epävarmuuksiin. Toinen on normalisoida epävarmuudet siten että rivin alkioiden summa on yksi. Jos epävarmuudet oletetaan hyvin pieniksi, voidaan matriisi linearisoida.

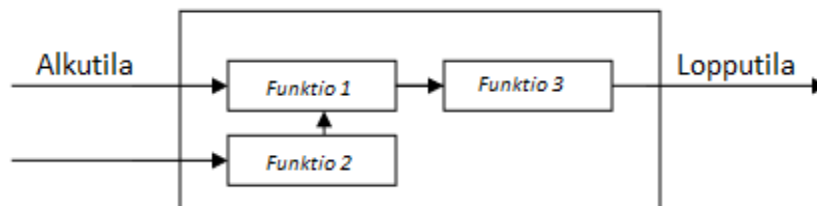
Suunnittelun rakennematriisia voidaan käyttää kuvaamaan elementtien välisiä yhteyksiä. Ne voivat olla fyysisiä yhteyksiä komponenttien välillä tai kausaalisia yhteyksiä parametrien ja järjestelmän ominaisuuksien funktioiden välillä.

## 2.4 Konseptin luominen

Konseptin luominen tarkoittaa sopivien komponenttien valintaa ja niiden yhteyksien ja sijaintien päättämistä. Päätaavoite on järjestää komponentit vastaamaan asiakkaan vaatimuksia.

### 2.4.1 Laatikkomalli

Laatikkomalli (*The black box model*) esittää tuotteen tai palvelun funktiota laatikkona, johon syötetään lähtötilanne (*Input states*) toisesta reunasta ja vastakkaisesta reunasta poistuu lopputilanne (*Output states*). Kuvassa 4 on esitelty laatikkomalli, jonka sisältö on avattu uusilla laatikkomalleilla.



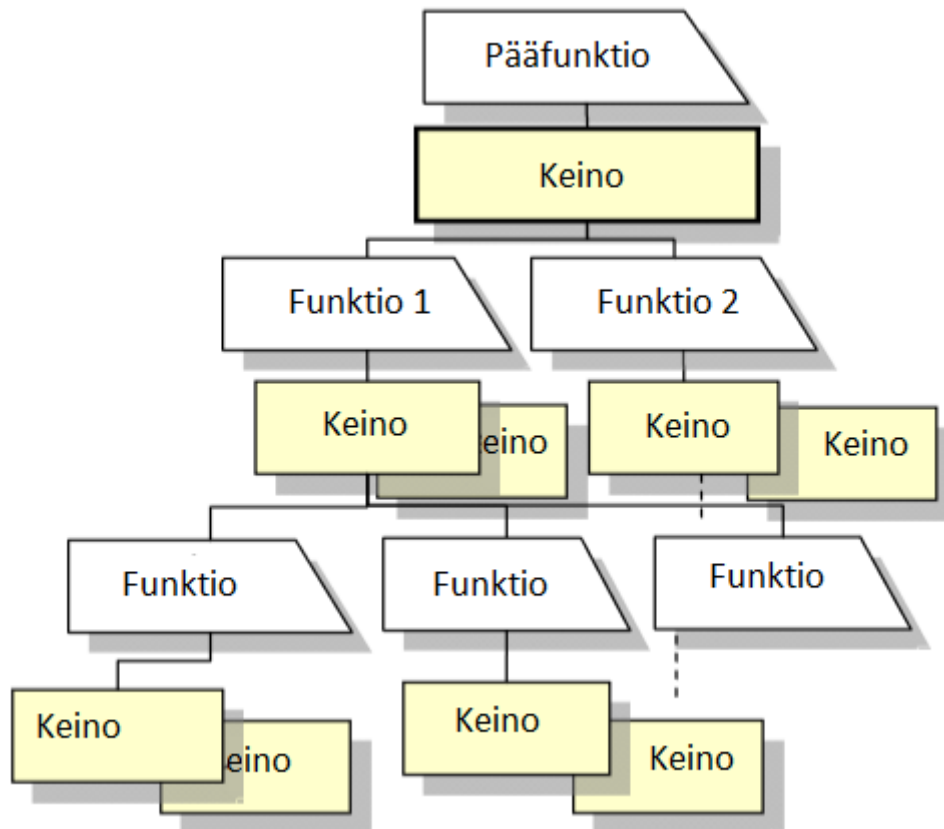
**Kuva 4.** Avattu laatikkomalli, josta ilmenee myös alisysteemit, muokattu lähteestä (Krus 2010, s. 79).

Jos laatikkoa käsittelee koko prosessina, lähtötilanteesta lopputilanteeseen, voidaan sen sisälle rakentaa uusia laatikoita kuvaamaan prosessin kulkua ja osaprosesseja. Laatikkomallin avaamista voidaan jatkaa FMT:llä.

### 2.4.2 Function means tree (FMT)

FMT on funktioiden purkamiseen suunniteltu työkalu. Nimensä mukaan FMT kuvaa puurakennetta, jossa tuotteen pääfunktio on huipulla. Pääfunktioilla tarkoitetaan tuotteen tai järjestelmän perimäistä tehtävää, esimerkiksi autolla ajamista. Pääfunktio voidaan johtaa järjestelmän ominaisuuksista, jotka on listattu laadun talossa.

FMT on metodi funktioiden purkamiseen ja ratkaisukeinojen (*Means*) järjestämiseen. Ylimpänä olevan pääfunktion alla on pääfunktion ratkaisukeino, tämä ratkaisukeino on mahdollista jakaa uusiin funktioihin alemmilla tasoilla, joiden ratkaisukeinot ovat niiden alla, näin syntyy kuusimainen rakenne. Pohjalla olevat keinot kuvaavat alisysteemejä tai komponentteja, joita voidaan käyttää tietyissä funktioissa. FMT on synteettinen työkalu, joka yhdistelee funktioita ja komponentteja ja jonka avulla konseptit muodostuvat systemaattisesti. Ratkaisukeinojen ja järjestelmän ominaisuuksien välinen yhteys voidaan kuvata matriisin avulla. Alisysteemit voidaan jakaa kuvaamaan hierarkkista rakennetta. Kuvassa 5 on esitelty valmiiksi rakennettu FMT, josta käy helposti ilmi koko systeemin rakenne.



**Kuva 5.** *Function means tree, muokattu lähteestä (Krus 2010, s. 80).*

Funktioiden ratkaisukeinoja saadaan morfologisella matriisilla, joka tuottaa kokonaisvaltaisen yleiskatsauksen vaihtoehtoisista ratkaisuista. Morfologisella matriisilla kuvataan ratkaisujen todennäköisyyksiä. Monimutkaisissa tuotteissa sitä voidaan käyttää korkeammilla suunnittelutasoilla tai konseptien valintaan sivuhaaroissa.

Kun mahdollisuuksien määrä kasvaa, pyritään konseptien seulonnalla poistamaan huonoimmat vaihtoehdot mahdollisimman nopeasti. Usein ratkaisukeinot ovat toisistaan riippuvaisia eikä niitä voi valita vapaasti ja kaikkien valittujen ratkaisujen tulee täyttää järjestelmälle asetetut vaatimukset. Vaihtoehtojen määrää voi rajata määrittämällä funktioille ääriarvoja ja rajoituksia. Jotkin ratkaisut voidaan poistaa jo alkuvaiheessa niiden ollessa selkeästi tarkoitukseen soveltumattomia.

Seulonnan jälkeen jäljellä tulisi olla ainoastaan käyttökelpoisia vaihtoehtoja, joiden tarkempi tutkiminen kannattaa. Seulonnan tulokset voivat olla myös negatiivisia, jolloin koko projekti voi osoittautua kannattamattomaksi jo ennen alkamistaan. Projektin vaatimuksia muuttamalla kannattavuus voi kuitenkin kasvaa.



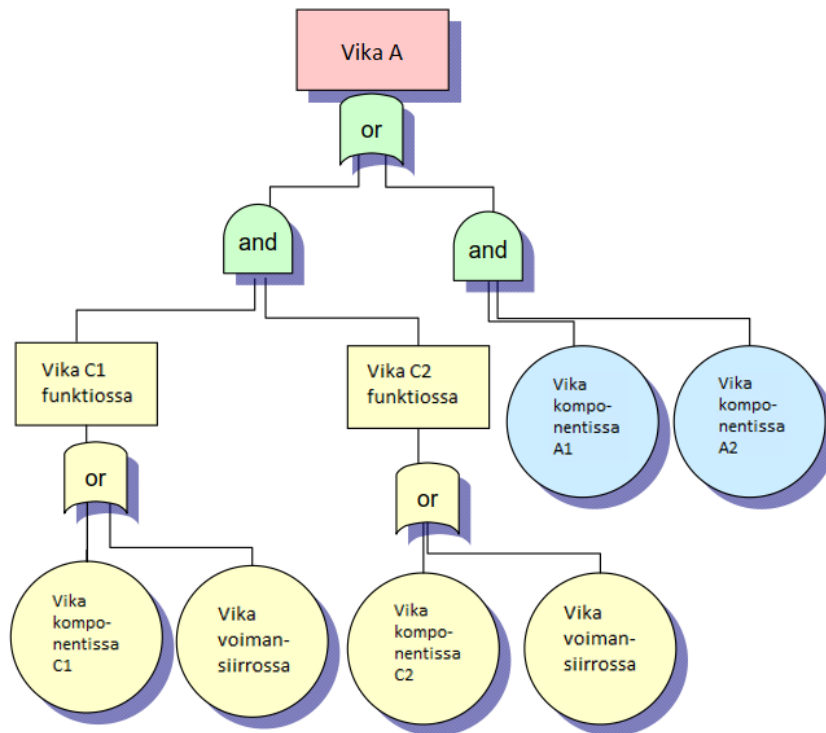
## 2.5 Vikapuuanalyysi (FTA)

Vikapuuanalyysiä (*Fault tree analysis*) käytettäessä käyttäjä voi havaita eri tapahtumien vaikutukset järjestelmässä. On mahdollista luoda luettelo tapahtumista, joiden seurauksena ylimmän tason tapahtumat tapahtuvat. Tämä mahdollistaa todennäköisyyksien numeerisen arvioinnin ja näin voidaan tarkastella suunnitelman kestävyyttä vikaantumistilanteissa.

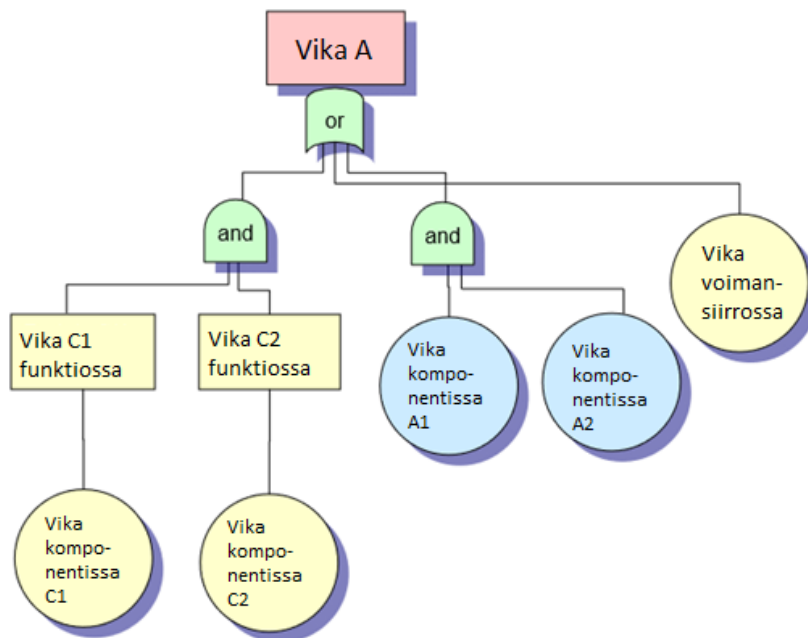
Vikapuun rakentaminen voidaan jakaa kahdeksaan kohtaan. Ensin tulee määrittää järjestelmän kohdat, joista vikapuuanalyysi tehdään. Systeemiin luodaan rajat ja ehdot, joiden sisältä vikaantumista tarkastellaan. Seuraavaksi määritellään systeemin tärkein elementti ja tarkennetaan analysoitavaa ongelmakohtaa, joka voi olla esimerkiksi turvallisuus. Kolmannessa kohdassa määritellään puun latvan rakenne, sekä ne tapahtumat ja ehdot, jotka vaikuttavat tai johtavat suoraan pääfunktioon. Neljännessä kohdassa laajennetaan jokaisen oksan peräkkäisiä yksityiskohtia. Tässä vaiheessa tulee määrittää ne tapahtumat ja ehdot, jotka vaikuttavat tai johtavat kaikkiin välitapahtumiin. Seuraavaksi ratkaistaan ne tapahtumien yhdistelmät, jotka johtavat ylimpään tapahtumaan. Kuudennessa kohdassa tunnistetaan rakenteesta ne kohdat, joiden vikaantuminen johtaa ylimmän tason vikaantumiseen. Tässä vaiheessa tulee myös tunnistaa tärkeimmät riippuvuudet eri tapahtumien välillä. Nämä ovat yksittäisiä tapahtumia, jotka voivat aiheuttaa useita skenaarioita tai ehtoja samanaikaisesti. Seitsemännessä kohdassa analysoidaan numeerisesti mikäli tarpeen. Tilastollisia menetelmiä käyttämällä voidaan arvioida eri tapahtumien tai komponenttien vikaantumisia ja korjaantumisia vikapuuhun. Tällä menetelmällä voidaan ennustaa järjestelmän suorituskyky tulevaisuudessa. Viimeisessä vaiheessa tuloksia käytetään päätöksentekoon sekä tunnistamaan järjestelmän heikkouksia. Kun järjestelmän heikkoudet on tunnistettu, niitä voidaan muokata vähentämään riskejä, jotka koskevat jo tunnettuja heikkouksia.

Todennäköisyyslaskelmat tehdään yleisten sääntöjen mukaan käyttämällä AND ja OR operaattoreita. Laskuissa AND tarkoittaa summaa ja OR tuloa kahden tai useamman muuttujan välillä.

Systeemistä voidaan tehdä varmempi kasvattamalla redundanssia. Oikein tehtynä tämä alentaa vikaantumisen riskiä huomattavasti. Esimerkiksi ohjaimen rajapinnassa, sekä ohjainten että toimilaitteiden tulee toimia. Yleensä nämä komponentit on kytketty sarjaan, tällöin vikapuussa käytetään OR operaattoria, eli koko systeemi vikaantuu, jos ohjain tai toimilaite vikaantuvat.



**Kuva 6.** Vikapuu, muokattu lähteestä (Krus 2010, s. 92)



**Kuva 7.** Vikapuu, muokattu lähteestä (Krus 2010, s. 93).

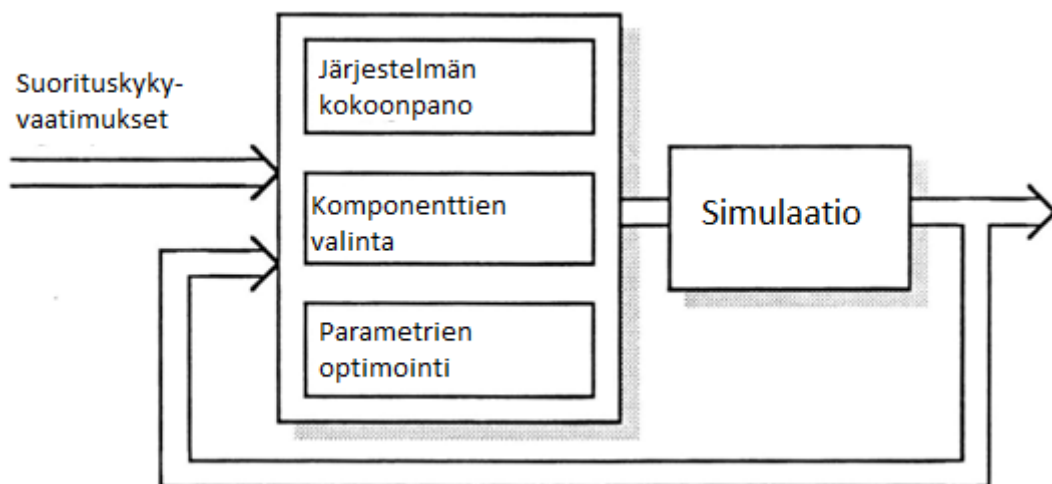
Useimmat tapahtumat liittyvät toisiinsa vaihtelevalla merkityksellä. Jos näitä yhteyksiä ei oteta huomioon vikaantumisriskiä laskettaessa, tulos on väärä. Esimerkiksi kuvan 6 tapauksessa energianlähde voi olla yhteinen, tällöin vikapuu täytyy uudelleen järjestää siten että koko järjestelmän vikaantuminen on puun latvassa kuvan 7 mukaisesti.

### 3. ANALYSIS AND OPTIMIZATION TOOL FOR ENGINEERING DESIGN

Tässä luvussa käsitellään Adrian J. Diez Gutiérrezin kirjoittamaa diplomityötä (2014), jonka aiheena on karkeamallinnuksen suunnitteluanalyysityökalu, joka on ohjelmoitu VBA:lla (*Visual Basic for Applications*). Tekstissä esitellään, miten edellisessä luvussa kuvattuja metodeja voidaan hyödyntää suunnittelutyössä. Gutiérrezin lähestymistapa pysyy järjestelmän ylimmällä tasolla ja keskittyy matemaattiseen mallintamiseen, erityisesti järjestelmän ominaisuuksiin ja parametreihin.

#### 3.1 Suunnitteluprosessi

Johdannossaan Gutiérrez määrittelee suunnitteluprosessin luovaksi prosessiksi, jonka agenda on ratkaista jokin ongelma tai luoda suotuisa ympäristö halutuille tapahtumille. Se kuuluu tuotekehityksen neljään pääalueeseen yhdessä valmistuksen, tuotetuen ja markkinoinnin kanssa. Suunnitteluprosessi voidaan ajatella silmukkana alla olevan kuvan mukaan.



**Kuva 8.** Suunnitteluprosessikaavio, muokattu lähteestä (Diez Gutiérrez 2014, s. 1).

Asiakkaan vaatimusten tai suoritusvaatimusten määrittelyn jälkeen tuotteeseen valitaan systeemille sopiva rakenne, komponentit ja lähtöparametrit. Seuraavaksi tehdään simulaatio valitulla konfiguraatiolla, jos tulokset eivät miellytä, muutetaan joitain lähtöarvoja ja simuloidaan uudelleen. Tätä silmukkaa ajetaan kunnes tulokset vastaavat asiakkaan vaatimuksia.

Suunnitteluanalyysityökalun tarkoitus on analysoida olemassa olevaa mallia ja auttaa ymmärtämään miten kyseisen mallin parametrit ja ominaisuudet vaikuttavat toisiinsa. Tämä

tekee muutosten optimoinnin helpoksi. Työkalu tekee suunnitteluanalyysin hyödyntämällä luvun 2.3.2 herkkyyssanalyysiä. Tampereen Teknillisen Yliopiston tutkimusprojektissa (Ellman et al. 2013) on todistettu tämän karkeamallinnuksen metodin tarkkuuden olevan tarpeeksi hyvä ja huomattavasti korkean tarkkuuden mallia nopeampi. Kun suunnitteluanalyysityökalua käytetään sekä tuotteen optimointiin, että herkkyyssanalyysiin, käyttäjä saa erinomaisen yleiskuvan suunnitelmastaan. Työkalu helpottaa kriittisten osien tunnistamista ja selkeyttää järjestelmän ominaisuuksien ja parametrien välisiä yhteyksiä.

Suunnitteluparametrit voidaan ajatella vakioina, jotka vaikuttavat muihin mallin yhtälöiden tekijöihin. Ne määrittävät hinnan ja riskin välistä suhdetta. Näiden parametrien optimointi ohjaa suunnitteluprosessia prosessin alkuvaiheessa.

Järjestelmän ominaisuudet ovat valmista tuotetta kuvaavia parametreja. Näitä ominaisuuksia ei voi muokata vapaasti vaan ne reagoivat yhtälöiden kautta järjestelmäparametreihin. Järjestelmän ominaisuuksiin vaikuttavat yhtälöt eli pääyhtälöt kuvaavat mallin mekaanista käyttäytymistä.

Kiinteät ja laskennalliset parametrit voivat olla muuttujia tai vakioita, joita käytetään mallintamaan järjestelmän ominaisuuksia. Kiinteä parametri voi olla esimerkiksi putoamiskiihtyvyys.

## 3.2 Käyttöliittymä

Suunnitteluanalyysityökalun käyttöliittymä sisältää kolme ydinosaa. Ensimmäinen on pääikkuna, jossa käyttäjä sijoittaa työkaluun kaiken ennalta tiedetyn informaation. Toinen ydinosa sisältää kiinteät parametrit ja mallintamiseen tarvittavat yhtälöt. Kolmas osa sisältää työlistoja, joista optimoinnin ja analyysin tulokset näkyvät.

Työkalu aukeaa pääikkunaan, jossa käyttäjä voi lisätä tai poistaa järjestelmän ominaisuuksia ja järjestelmäparametreja. Tässä ikkunassa näkyvät suunnitteluparametrien lähtöarvot ja rajat, joiden sisällä optimointi tapahtuu, sekä parametrien tavoitearvot ja järjestelmän ominaisuuksien todelliset arvot. Pääikkunassa käyttäjä näkee myös järjestelmän ominaisuuksien tärkeyden arvon sekä kumpaan suuntaan sitä pitäisi muuttaa.

Mallintamisikkunassa käyttäjä voi lisätä tai poistaa kiinteitä parametreja ja järjestelmän yhtälöitä. Kiinteiden parametrien arvot voidaan vapaasti määrittää. Tässä ikkunassa käyttäjä näkee myös edellä mainittujen yhtälöiden tulokset. Tuloksia ei voi muokata, sillä ne kuvaavat järjestelmän ominaisuuksia. Mallin yhtälöihin käyttäjä voi kuitenkin vaikuttaa.

Jos tuotetta kuvaava malli on jo olemassa, käyttäjä voi operoida suunnitteluanalyysityökalua pääikkunassa hallintapainikkeilla. Pääikkunassa käyttäjä voi suorittaa kaikki tärkeimmät työkalun tehtävät.

Suunnitteluparametrien arvoja voi vapaasti muokata pääikkunassa. Tämän seurauksena loput muuttujat muuttuvat välittömästi määritettyjen yhtälöiden mukaan. Optimointityökalu muuttaa lähtöparametrit mahdollisimman lähelle tavoitearvoja, jotka voidaan määrittää pääikkunassa. Järjestelmän ominaisuuksien ja parametrien tärkeysarvot voidaan laskea suunnitteluanalyysityökalulla tai ne voidaan asettaa käsin.

Suunnitteluparametrien herkkyyssanalyysin tulokset analyysityökalu esittää kahdella matriisilla; normalisoidulla herkkyyssmatriisilla ja suhteellisella herkkyyssmatriisilla, edellä mainitut matriisit on esitelty kuvassa 3. Suunnitteluanalyysityökalu laskee ja esittelee järjestelmän ominaisuuksien riippuvuudet automaattisesti. Tulokset näkyvät erillisessä ikkunassa. Kun tuotteen yksityiskohtia tutkitaan, korrelaatioita koskeva tieto on tärkeää. Korrelaatioiden avulla tunnistetaan ne parametrit, joita voidaan muokata vaikuttamatta merkittävästi muihin parametreihin.

Optimointityökalu muokkaa muuttujien arvoja, tietyissä rajoissa, vastaamaan alkuperäisiä vaatimuksia. Muuttujan tärkeyden arvo optimoinnissa määrittää kahden muuttujan välistä valintaa, suuremman arvon omaava muuttuja muuttuu ensin. Algoritmi pyrkii ensin optimoimaan mallin vastaamaan vaatimuksia huomioimatta muuttujien tärkeyttä, ja vasta sitten optimoimaan tietyt järjestelmäparametrit. Määriteltävät optimointiasetukset sisältävät iterointikierrosten lukumäärän, tarkkuuden ja toleranssit. Jos käyttäjä ei erikseen määrittele näitä parametreja, työkalu käyttää oletusarvoja.

### 3.3 Suunnitteluanalyysin funktiot

Suunnitteluanalyysin keskeinen tavoite on mallin tärkeimpien tekijöiden ymmärtäminen ja hyödyntäminen. Ymmärtämällä tärkeimmät tekijät voidaan mallia muokata haluttuun suuntaan, esimerkiksi kevyemmäksi tai painavammaksi. Matriisifunktioiden hyödyntäminen on kannattavaa, sillä ne kuvaavat järjestelmän ominaisuuksien ja parametrien suhdetta yksinkertaisella tavalla. Suunnitteluparametrien ja järjestelmän ominaisuuksien välistä yhteyttä voidaan kuvata asiakasvaatimusten ja järjestelmän ominaisuuksien välisenä suhteena kaavan (12) mukaan

$$\{Y\} = [A]\{X\}. \quad (12)$$

Kaavassa (12),  $A$  on matriisi, joka kuvaa suunnitteluparametrien, vektorin  $X$ , ja järjestelmän ominaisuuksien, vektorin  $Y$  välistä yhteyttä. Yllä olevassa kaavassa  $X$ :n ja  $Y$ :n välinen suhde oletetaan lineaariseksi. Vastaavaa lineaarista oletusta voidaan hyödyntää myös suunnitteluparametrien  $Y$  ja järjestelmän vaatimusten  $X$  välisestä suhteesta, tällöin  $A$  on suunnittelumatriisi. Kaavan (10) kaltaista suhdetta voidaan kuvata myös luvun 2.3.1 tapaan, aksiomaattisena. Tällöin matriisista  $A$  pyritään tekemään mahdollisimman yksinkertainen.

Ensisijaisuus tai tärkeys kuvaa muuttujan painoarvoa eli vaikutusta mallin lopputulokseen. Suunnitteluanalyysityökalussa on funktio, joka määrittää jokaiselle järjestelmän ominaisuudelle tärkeysarvon kuvan 1 kaltaisen vertailumatriisin avulla.

Suunnitteluanalyysityökalun herkkyysanalyysi perustuu herkkyysmatriisiin, eli kaavaan (6). Herkkyysanalyysiä käytetään suunnitteluparametrien ja järjestelmän ominaisuuksien välisten yhteyksien määrittämiseksi. Työkalu sisältää myös normalisoidun ja suhteellisen herkkyysmatriisin, joiden ominaisuuksia on käsitelty luvussa 2.3.2.

Kun järjestelmän ominaisuudet ovat ristiriidassa keskenään, voi suunnittelija hyödyntää suunnitteluanalyysityökalun laskemaa SCC-matriisia. SCC-matriisia on käsitelty luvussa 2.3.3.

### 3.4 Optimointi

Suorituskykyyn merkittävästi vaikuttavien parametrien tunnistaminen on erittäin tärkeää, silloin kun parametrien määrä on liian suuri numeeriseen optimointiin. Näitä parametreja kutsutaan pääparametreiksi, joilla malli voidaan optimoida suoritusajan minimoimiseksi.

Optimointimetodit voidaan jakaa kahteen luokkaan, gradientteihin ja epägradientteihin metodeihin. Gradientit metodit sopivat ongelmille, joiden funktioiden gradientti voidaan laskea tietyssä pisteessä. Yleisin gradienttimenetelmä on Simplex-metodi. Epägradienttimetodit soveltuvat erinomaisesti epälineaaristen funktioiden tai useiden muuttujien funktioiden optimointiin. Koska tutkittu suunnitteluanalyysityökalu on tehty Excelillä, hyödyntää se Excelin omaa Solver-työkalua. Se käyttää GRG2 optimointialgoritmia, joka sopii epälineaaristen ongelmien optimointiin.

Optimointialgoritmi on suunniteltu suorittamaan vaadittu määrä laskutoimituksia pääparametrien optimoimiseksi. Kun optimointi on suoritettu, järjestelmän ominaisuudet täyttävät järjestelmälle asetetut vaatimukset. Optimointiprosessi on määritelty usean muuttujan pakotetuksi optimointiongelmaksi allaolevan kaavan (13) mukaan

$$f_j(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (13)$$

Kaavassa (13)  $m$  on järjestelmän vaatimusten lukumäärä,  $n$  on järjestelmän ominaisuuksien lukumäärä. Funktiot  $x_{n+1}, \dots, x_m$  riippuvat parametreista  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

$$g_i < x_i < h_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

kaavassa (14),  $g$  ja  $h$  ovat suunnitteluanalyysityökalulle asetetut ylä- ja alarajat, ne voivat olla vakioita tai suunnitteluparametrien funktioita.

Optimoinnin tavoitteena on löytää suunnitteluparametrien arvot  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , jotka pysyvät rajojen  $g$  ja  $h$  sisällä ja pystyvät suorittamaan järjestelmän ominaisuuksien yhtälöt  $f_j(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , ottaen huomioon jokaisen muuttujan aiemmin määritellyt painoarvot.

Excelin Solver-toiminto pystyy optimoimaan monimuuttujafunktion useilla rajoituksilla GRG2-metodia hyödyntäen. GRG2-metodi käyttää toisen asteen muuttujien funktioita, siksi optimointialgoritmin täytyy luoda pääfunktio (*Master equation*), joka sisältää kaikki järjestelmän ominaisuuksien funktiot ja järjestelmän ominaisuuksien painoarvot. Algoritmi luo pääfunktion kaavalla (15)

$$M(f_j) = \sum_{j=1}^m f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) w_j. \quad (15)$$

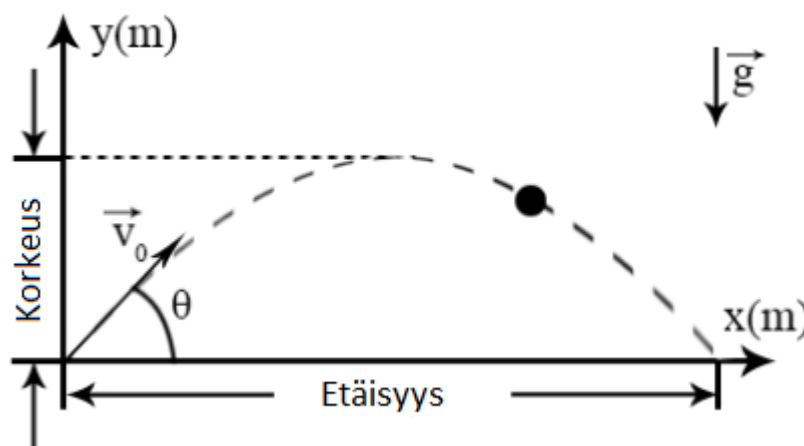
Kaavassa (15),  $w$  on järjestelmän ominaisuuden painoarvo,  $m$  järjestelmän ominaisuuksien kokonaismäärä ja  $M(f_j)$  pääfunktio, jota Solver pyrkii optimoimaan tavoitearvoon.

Solver-työkalulle voi asettaa erilaisia rajoituksia ja ohjeita, joiden mukaan se pyrkii optimoimaan, näistä asetuksista kolme tärkeintä ovat iteraatiokierrosten lukumäärä, tarkkuus ja toleranssi. Optimointityökalun toleranssilla tarkoitetaan tuloksen virhemarginaalia, mitä suurempi prosentti sitä pienempi optimointiaika. Virhemarginaalin tulisi olla alle 12%. Yleensä karkeamallin optimointiprosessi on erittäin nopea, riippuen käytetystä tietokoneesta, mallin monimutkaisuudesta ja käytettyjen yhtälöiden lukumäärästä.

### 3.5 Käytännön tapaus

Malli voidaan ajatella kokonaisuutena, joka sisältää yhtälöitä, muuttujia ja vakioita. Kun mallin rakenneosat on tunnistettu, tulee ne jakaa järjestelmän ominaisuuksiin, kiinteisiin parametreihin ja pääparametreihin. Seuraavaksi tämä kokonaisuus sijoitetaan suunnitteluanalyysityökaluun.

Tässä tapauksessa käsitellään kappaletta, joka liikkuu karteesisessä koordinaatistossa paraabelin kaltaista lentorataa. Kappaleella on lähtönopeus  $V_0$  ja lähtökulma  $\theta$ . Tapaus on esitelty kuvassa 9.



**Kuva 9.** Kappaleen lentorata kaksiulotteisessa karteesisessä koordinaatistossa, muokattu lähteestä (Díez Gutiérrez 2014, s. 30).

Järjestelmän ominaisuuksiksi on määritetty etäisyys vaakasuunnassa ja korkeuden maksimi, suunnitteluparametreiksi lähtönopeus  $V_0$  ja lähtökulma  $\theta$  ja kiinteäksi parametriksi putoamiskiihtyvyys  $g$ . Mallintamiseen käytetyt yhtälöt on esitelty alla

$$\textbf{Etäisyys} = \frac{V_0^2 \sin(\theta)}{g}, \quad (16)$$

$$\textbf{Korkeuden maksimi} = \frac{V_0^2 \sin(\theta)^2}{2g}. \quad (17)$$

Lähtönopeus on rajoitettu välille  $0 \leq V_0 \leq 50 \frac{m}{s}$  ja lähtökulma  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ . Etäisyyden tavoitearvo on 100 m ja korkeuden 15 m.

Herkkyysanalyysin mukaan lähtönopeuden merkitys etäisyyteen on suurempi kuin lähtökulmalla. SCC-matriisista selviää järjestelmän ominaisuuksien välinen korrelaatio: jos lähtönopeutta kasvatetaan, nousee myös lähtökulma.

Näin yksinkertaisessa optimointitehtävässä virhemarginaali voidaan säätää infinitesimaalisen pieneksi, käytännössä nollaan. Kuulantyyntötehtävän optimoinnissa ei tarvitse valita pääparametreja, sillä parametrien kokonaismäärä on niin pieni.

Gutiérrezin tekstissä esitellään myös monimutkaisempia tapauksia, mutta edellä käsitelty kappaleen lentorataa mallintava tapaus kuvaa mielestäni riittävästi suunnitteluanalyysityökalun toimintaa. Muut käytännön tapaukset ovat siirrettävän liikealustan (*Portable motion platform*) ja sähköisen kulkuneuvon (*Electric vehicle*) mallintamista.



## 4. COMPARISON OF LOW AND HIGH FIDELITY APPROACH IN MODEL BASED DESIGN IN THE CASE OF A PORTABLE MOTION PLATFORM

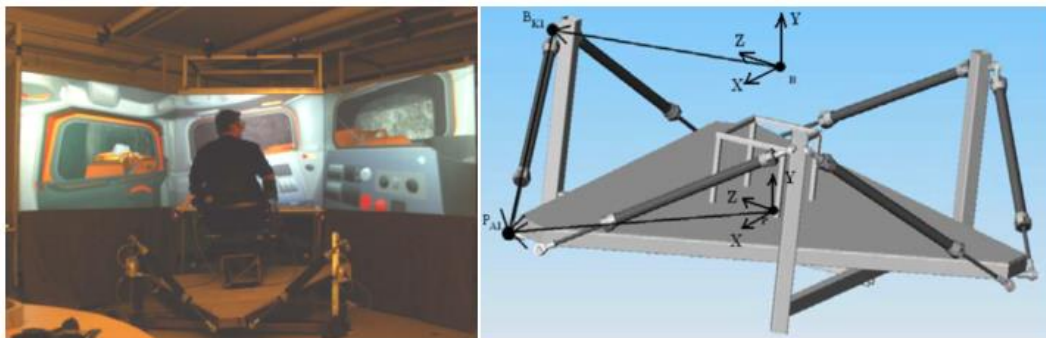
Tässä luvussa selvitetään edellisen luvun lopussa mainitun siirrettävän liikealustan mallintamista. Professori Asko Ellmanin, professori Petter Krusin ja Ville Jouppilan kirjoittamassa artikkelissa *Comparison of low and high fidelity approach in model based design in the case of a portable motion platform* (2013) käsitellään kahta eri mallia, toinen karkean ja toinen korkean tarkkuuden.

Matlab- ja Simulink mallit sisältävät usein toolboxeja, työkalupakkeja, jotka hyödyntävät erilaisia matemaattisia mekanismeja. Näiden avulla monimutkaisten, monitieteellisten kokonaisuuksien mallintaminen on helppoa. Tällaiset mallit ajatellaan korkean tarkkuuden malleina, ne ovat erittäin yksityiskohtaisia ja voivat sisältää valtavan määrän parametreja.

Perinteinen lähestymistapa on luoda yksinkertaistettuja yhtälöitä kuvaamaan selkeitä yhteyksiä järjestelmän ominaisuuksien ja suunnitteluparametrien välille. Nämä mallit ovat karkeamalleja, sillä ne vaativat realimaaliman yksinkertaistamista ja heuristisia oletuksia. Karkeamallit ovat usein erittäin nopeita ja yksiselitteisiä, tarkkuus sen sijaan ei yleensä ole hyvä. Ellmanin et al. artikkelissa karkeamallin tekemiseen on käytetty edellisen luvun suunnitteluanalyysityökalua.

### 4.1 Siirrettävä liikealusta

Virtuaalitekniologiaa hyödynnetään jatkuvasti liikkuvien koneiden suunnittelussa. Ellmanin et al. kirjoittama artikkeli kuvaa liikealustan suunnittelua tietyillä edellytyksillä: alustan pitää olla halpa ja kahden ihmisen pitää pystyä siirtämään sitä. Lopullisen tuotteen käyttötarkoitus on toimia alustana ajettavan kulkuneuvon, esimerkiksi kuorma-auton hytin, liikkeen simuloinnissa. Valmiin tuotteen käyttöä on esitelty kuvassa 10.



**Kuva 10.** Siirrettävän liikealustan käyttö ja 3D-malli (Ellman et al. 2013, s. 3).

Alustan kallistumista säätelevät sylinterit toimivat paineilmalla. Paineilmasyylinterit on valittu niiden korkean voima-painosuhteen, alhaisen hinnan ja helpon huollettavuuden vuoksi.

Kuvan 10 kaltaisen alustan suunnittelu on haastavaa monimutkaisen rakenteen ja usean rakenteellisen rajoituksen vuoksi. Tärkeimmät alustalle asetetut vaatimukset on listattu alla.

- Alustan tulee olla kahden miehen kannettavissa
- Alustan tulee olla tarpeeksi matala simulaattorin näytöille
- Alustan tulee olla tarpeeksi pieni sopiakseen sille tarkoitettuun tilaan
- Alustan tulee pystyä luomaan tarpeeksi suuri pystysuora kiihtyvyys
- Alustan tulee pystyä luomaan tarpeeksi suuri vaakasuuntainen kiihtyvyys
- Alustan tulee kallistua tietyn verran

Alustan tehtävänä on jäljitellä työkonene ohjaamon liikkeitä. Tämä tarkoittaa tiettyä vaatimusta kiihtyvyydelle ja alustan kallistumiselle.

#### 4.1.1 Korkean tarkkuuden malli

Mallintamiseen pohjautuva insinöörityö käyttää suunnitteluprosessissa suurella tarkkuudella ennakoivia malleja yhdessä tunnetun tiedon kanssa. Malleja käytetään valmistettavan tuotteen mahdollisuuksien tutkimiseen. Liikealustan mallintamiseen käytetyt funktiot kuvaavat virtausta, painetta ja sylintereiden voimia. Tätä mallia voidaan käyttää optimoimaan tuotteen eri alueita.

Korkean tarkkuuden malli on tehty käyttäen Matlabia, Simulinkia ja SimMechanics toolboxia. SimMechanics mahdollistaa monimutkaisten mekaanisten systeemien mallintamisen, simuloinnin ja analysoinnin. Sen avulla on mahdollista suunnitella erilaisia hallintalaitteita mekaanisille systeemeille. Liikealustan mekaaniset osat on mallinnettu SimMechanicsilla ja pneumaattiset toimilaitteet Simulinkilla. Kokonaisuudessaan malli sisältää 22 itsenäistä blokkia sekä 36 yhdistelmäblokkia. Jokaiselle itsenäiselle blokille täytyy

määrittää massakeskipiste ja hitausmomentti. Yksityiskohtainen alkugeometria on mallinnettu Matlabilla. Mallin parametrit on valittu joko analyttisesti tai empiirisesti.

Pneumaattinen kokonaisuus sisältää ohjausventtiilin ja sylinterintoimilaitteen mallit. Ohjausventtiilin tehtävänä on muuttaa saapuva signaali massavirraksi. Toimilaite vastaanottaa massavirran ja muuttaa sen voimaksi, jota SimMechanics malli voi hyödyntää. Toimilaitemalli koostuu dynaamisen paineen yhtälöstä, virtaus- ja lepokitkan yhtälöistä sekä epälineaarisesta voimasta, jota kuvataan toimilaitteen paineen ja siirtymän funktiona.

Mallilla tehdyt simulaatiot kertovat selkeästi vastaako alkuperäinen suunnitelma vaatimuksia. Ensimmäinen simulaatio on tehty pelkkien voimien avulla, näin on saatu määriteltyä alustan liikuttamiseen vaaditut voimat. Jotta malli olisi mahdollisimman realistinen lisättiin lopulliseen kokoonpanoon pneumaattiset mallit. Loppukokoonpanon simulaatiolla selvitetiin pystyvätkö valitut toimilaitteet tuottamaan tarpeeksi suuria voimia kyllin nopeasti alustan liikuttamiseen.

#### 4.1.2 Karkeamalli

Yksinkertaistettu karkeamalli on määritetty tutkimalla alustan merkittäviä pisteitä toimilaitteiden ääriasennoissa sekä puolivälissä. Tämän mallin optimointi on tehty luvun 3 suunnitteluanalyysityökalulla. Trigonometriaa ja voimien tasapainoyhtälöitä hyödyntämällä on voitu luoda yksiselitteiset yhtälöt alustan ominaisuuksille

$$a_y = \frac{6F_a \sin(\alpha_{mid}) - mg}{m}, \quad (18)$$

$$a_x = \frac{2F_a \cos(\alpha_{mid})}{m}, \quad (19)$$

$$\omega_{\max} = \tan^{-1}\left(\frac{h_{\max} - h_{\min}}{R + r}\right). \quad (20)$$

Yllä olevat kaavat (18), (19) ja (20) kuvaavat alustan toimintaa karkeamallissa. Kaavoissa  $F_a$  on yhden sylinterin maksimivoima,  $m$  liikealustan massa ja  $g$  putoamiskiihtyvyys. Vaikka parametrien ja tärkeimpien järjestelmän ominaisuuksien välinen yhteys on helppo mallintaa, sen avulla ei voi tarkastella lopullisen tuotteen yksityiskohtia.

## 4.2 Vertailu

Edellä esiteltyjen lähestymistapojen vertailu on hankalaa. Mallien tuottama hyöty riippuu käyttäjän osaamistasosta. Käyttäjän tieto käytetyistä työkaluista ja mallinnuksen kohteesta vaikuttaa oleellisesti mallista saatavaan hyötyyn. Mallintamiseen vaikuttaa myös käytettävissä olevien työkalujen sopivuus mallinnettavaan tapaukseen, usein jokin osa mallista vaatii perusyhtälöiden muokkaamista.

**Taulukko 1:** Mallien vertailutaulukko, muokattu lähteestä (Ellman et al. 2013, s. 8).

	Karkeamalli	Korkean tarkkuuden malli
<b>Yhtälöiden lukumäärä</b>	14	30 yhtälöä + 58 blokkia
<b>Parametrien lukumäärä</b>	10	270
<b>Mallintamiseen käytetty aika (h)</b>	7	170
<b>Analysointiin käytetty aika (h)</b>	1	16
<b>Mallintamiseen tarvittu tietotaito</b>	Matala	Korkea

Kuten yllä olevasta taulukosta näkyy, korkean tarkkuuden mallin ongelma on yhtälöiden ja muuttujien suuri lukumäärä. Merkittävin taulukosta ilmenevä ero on mallintamiseen ja analysointiin käytetty aika, karkeamalli on rakennettu ja analysoitu yhden työpäivän aikana, kun puolestaan korkean tarkkuuden mallin rakentamiseen kuluu noin kolme työviikkoa. Vaikka nykyaikaiset tietokoneet toimivatkin nopeasti, on silti otettava huomioon, että korkean tarkkuuden mallin simulaatioon kuluva aika on selkeästi pidempi.

**Taulukko 2:** Mallien tarkkuuksien vertailutaulukko, muokattu lähteestä (Ellman et al. 2013, s. 9).

Mitattu arvo		Karkeamalli		Korkean tarkkuuden malli	
		Arvo	Suhteellinen virhe	Arvo	Suhteellinen virhe
<b>ay</b>	3.6 m <sup>2</sup> /s	4.37 m <sup>2</sup> /s	21 %	3.75 m <sup>2</sup> /s	4 %
<b>ax</b>	12.2 m <sup>2</sup> /s	12.2 m <sup>2</sup> /s	25 %	9.45 m <sup>2</sup> /s	6 %
<b>ω<sub>max</sub></b>	16°	15.7°	2 %	16.3°	2 %

Taulukosta 2 nähdään että karkeamallin suhteellinen virhe on alle 25%, mikä on hyväksyttävää suunnitteluprosessin alkuvaiheessa. Korkean tarkkuuden mallin suhteellinen virhe on alle 6%, mikä sopii yksityiskohtaiseempaankin suunnitelmaan. Kummankin mallin suhteellinen virheprosentti kallistuskulmassa on sama, mikä johtuu alustan rakenteesta, jonka ansiosta kyseinen kulma on helppo laskea..

## 5. ON THE COST OF LOW-FIDELITY MODELLING

Tässä luvussa käsitellään professoreiden Meng-Lai Yinin ja John Angusin kirjoittamaa artikkelia: *On the cost of low fidelity modeling: The case for a performability approach* (2008), joka käsittelee vaihtoehtoisia ongelmanratkaisukeinoja. Tekstissä esitellään kolme erilaista lähestymistapaa ongelmanratkaisuun, hajotusmetodi (*Decomposition method*), state-space -mallinnus ja karkeamallintaminen. Hajotusmenetelmässä ongelma jaetaan helpommin ratkaistavissa oleviin itsenäisiin ongelmiin. State-space -mallissa, mallin koko kasvaa eksponentiaalisesti käytettävien komponenttien lukumäärän kasvaessa, mikä johtaa nopeasti erittäin monimutkaiseen malleihin. Karkeamallinnuksessa helpotetaan laskennallista monimutkaisuutta yksinkertaistamalla tapahtumia. Yksinkertaistaminen voi kuitenkin olla harhaanjohtavaa, jos suunnittelijalla ei ole kokonaisvaltaista käsitystä mallinnettavasta tilanteesta.

Artikkelissa systeemi ajatellaan binääriseksi, toimilaite on joko aktiivinen tai valmiustilassa. Reaalimaailmassa toimilaitteen tilan siirtyminen aktiivisesta passiiviseen ei tapahdu diskreetisti vaan tilanmuutokseen kuluu aikaa. Jotta yllä esitellyissä malleissa voitaisiin ottaa tilanmuutoksesta johtuva aika huomioon, pitäisi järjestelmään luoda uusi tila siirtymää varten. Uuden vaiheen lisääminen tekisi kuitenkin mallista huomattavasti monimutkaisemman.

Karkeamallinnuksessa systeemisuunnittelijat usein aliarvioivat tilanmuutoksesta syntyvän ajan vaikutukset, esimerkiksi tuotteen suorituskyky voi kärsiä, vaikkei tuote hajoaisikaan. Tällainen konservatiivinen ajattelutapa voi johtaa ylimääräiseen työhön.

Komponenttien luoman verkoston luotettavuutta voidaan arvioida state-space mallin avulla. Jos komponenttien lukumäärä on  $n$ , on mallissa  $2^n$  tilaa. Tilojen määrä tekee korkean tarkkuuden mallien luomisesta mahdotonta. Artikkelin mukaan tarkkuuden ja mallin monimutkaisuuden välille ei ole löydetty systemaattista arviointitapaa.

### 5.1 Lähestymistapa

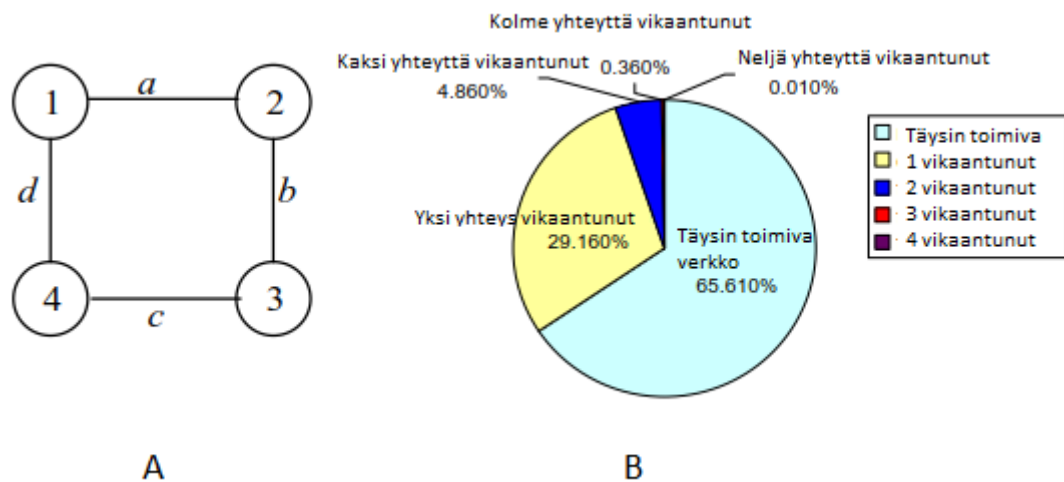
Ajatuksena on järjestää komponentit suorituskykyä kuvaavien ominaisuuksien mukaan. Artikkelissa esitellyssä lähestymistavassa toimilaitteiden tiloja ei kuvata binaaristi; päällä-pois, vaan suorituskyvyn avulla. Tällöin järjestelmää voidaan mallintaa huonommalla suorituskyvyllä. Suorituskyvyllä tehdyn luotettavuusanalyysin avulla voidaan tutkia tarkkuuden ja monimutkaisuuden välistä suhdetta. Luotettavuusanalyysi on prosessi, jossa komponenttien tilojen todennäköisyyksiä käydään läpi. Prosessi voidaan lopettaa heti, kun luotettavuudelle ja suorituskyvylle asetetut vaatimukset on saavutettu.

Komponenttien vikaantuessa myös suorituskyky laskee. Komponentti, jonka suorituskyky on huonoin, vaikuttaa komponenteista vähiten koko systeemiin. Järjestämällä komponentit suorituskyvyn mukaan, mallin laskenta voidaan suorittaa hyvällä tarkkuudella kasvattamatta monimutkaisuutta, johon vaikuttavat laskukyky sekä asetetut vaatimukset.

## 5.2 Verkoston luotettavuuden case-tutkimus

Verkoston luotettavuuden tarkastelu on NP-vaikea-luokan ongelma. NP-vaikea-luokan ongelmat sisältävät kaksi ominaisuutta: niiden avulla voidaan mallintaa useita merkittäviä ongelmia ja mainituille ongelmille ei ole löydetty yksiselitteistä ratkaisua (Tovey 2002). On olemassa kolme yleisesti käytettyä verkoston luotettavuuden mittaustapaa; K-, 2- ja All-terminaalit. Kaikki mittaustavat perustuvat verkostokuvaajaan  $G = (V, E)$ , jossa  $V$  on solmujen lukumäärä ja  $E$  solmukohtien välisten yhteyksien lukumäärä. K-terminaalissa kaikki solmut ryhmässä  $K$  ovat yhteydessä toisiinsa, 2-terminaalissa ryhmään  $K$  kuuluvien solmujen lukumäärä on 2 ja All-terminaalissa  $K = V$ . Käsiteltävässä tapauksessa vikaantuminen tapahtuu ainoastaan solmujen välisissä yhteyksissä.

Korkean tarkkuuden verkoston luotettavuusanalyysin monimutkaisuus kasvaa eksponentiaalisesti verkostolla, joka sisältää  $n$  määrän yhteyksiä. Jos tarkasteltava systeemi on antisymmetrinen, järjestelmän monimutkaisuus muodostuu merkittäväksi ongelmaksi.



**Kuva 11A.** Neljän solmun kehäverkosto (Yin & Angus 2008, s. 3).

**Kuva 11B.** Verkon vikaantumisen todennäköisyys, muokattu lähteestä (Yin & Angus 2008, s. 4).

Esimerkin verkosto on kuvan 11A mukainen. Verkosto sisältää neljä solmua, joiden väliset yhteydet muodostavat suljetun kehän. Karkeamalli pystyy käsittämään vain täydellisesti toimivan systeemin ja yhden yhteyden vikaantumisen. Nyt luotettavuusprosentti on 94.7%, joka on vähemmän kuin vaadittu 95%. Suorituskykyä tarkastelevalla lähestymistavalla huomataan, että järjestelmä voi toimia joillain kahden vikaantuneen yhteyden

kombinaatiolla. Näin tarkasteltuna luotettavuus nousee 96.9%, joka ylittää vaatimukset. Vikaantumisten todennäköisyydet on esitelty kuvassa 11B.

Tarkastellun esimerkin tapauksessa mallin tarkkuutta olisi voitu kasvattaa ottamalla huomioon myös kolmen vikaantuneen yhteyden tapaus. Tämä olisi kuitenkin kasvattanut mallin monimutkaisuutta tarpeettomasti, sillä riittävä luotettavuus on jo saavutettu.

## 6. A MULTI-FIDELITY MODELLING APPROACH FOR EVOLUTION AND OPTIMIZATION OF WING STROKE AERODYNAMICS IN FLAPPING FLIGHT

Tässä luvussa käsitellään vuonna 2013 ilmestynyttä artikkelia *A multi-fidelity modelling approach for evaluation and optimization of wing stroke aerodynamics in flapping flight* (2013), joka kuvaa MAVin (*Micro-aerial vehicle*) mallintamista. Artikkelin tarkoituksena on suunnitella kone, jonka leijuminen perustuu kiitäjän, *Manduca sexta*n, lentoon. Rakenteen ongelma on siiven iskun pyörivän liikkeen puuttuminen. Biologiaan perustuva lähestymistapa vaatii työkaluja, jotka pystyvät arvioimaan erilaisia ratkaisuja ja valitsemaan niistä sopivimman. Empiirinen tutkimus on hyvä työkalu edellä mainittujen ratkaisujen tutkimiseen, mutta suurella otannalla siihen kuluu paljon aikaa ja muita resursseja. Artikkelin mukaan kyseisen ongelman tutkimiseen paras vaihtoehto onkin matemaattinen mallintaminen.

Matemaattisessa mallintamisessa tulee tehdä kompromissi mallin tarkkuuden ja käytettävissä olevan laskutehon välillä. Tässä artikkelissa malli koostuu karkean tarkkuuden BE-mallista (*Blade-element model*) sekä korkean tarkkuuden Navier-Stokes -yhtälöiden ratkaisusta. NS-mallit vaativat huomattavasti enemmän laskutehoa kuin BE-mallit.

### 6.1 Mallintaminen

Matemaattista mallia varten siipi on jaettu siiven jänteiden suuntaisiin säikeisiin. Säikeiden avulla siipiin kohdistuvat dynaamiset voimat on mahdollista laskea. Näihin voimiin vaikuttavat eläimen, tai koneen vauhti, siipeä ympäröivän fluidin nopeus sekä siiven ja fluidin välisen liikkeen kulma.

#### 6.1.1 BE-malli

Voimien ja siiven kulman yhteyden välille luodaan funktio, noste ja ilmanvastus oletetaan vakioiksi. BE-mallit ottavat huomioon myös muita välittömiä voimia kuten fluidin tiheyden muutoksen ja siiven kääntymisen kesken lyönnin.

BE-malli on näennäisstabiilin tilanteen analyysin muoto, jossa siiven aerodynaaminen suorituskky oletetaan riippumattomaksi kaikista muista ympärillä tapahtuvista tapahtumista. Tästä johtuen tällä mallilla ei voida tehdä ajasta riippuvaa tarkastelua eikä se ota huomioon siiven liikkeen aiheuttamia pyörteitä.



Heikkouksistaan huolimatta, BE-malleilla on monia erinomaisia käyttökohteita sekä bioteknologiassa että konetekniikassa. Niiden suurin hyöty on matemaattinen yksinkertaisuus ja muokkautuvuus. BE-mallien avulla on helppo yhdistää kokeellisesti saavutettua dataa matemaattisiin yhtälöihin.

Artikkelissa käytetty BE-malli laskee siipiin kohdistuneet välittömät kokonaisvoimat jokaisen säikeen infinitesimaalisten voimien summana. Voimat muodostuvat näennäisstaabiilisten aerodynaamisten moniparametristen mallien pohjalta. BE-mallien yksinkertaisuus mahdollistaa moniparametristen mallien rakentamisen. Artikkelissa säikeiden voimat on laskettu perustuen siiven kulmaan, jätteen suuntaisen akselin kiertymään, nopeuteen ja kiihtyvyyteen. Kumpikin siipi kuvataan jäykkänä, tasaisena levynä, vaikka todellisuudessa siivet taipuvat. Siipien liikettä kuvataan pallokoordinaatistossa siiven kärjen suhteena siiven kiinnityskohtaan. Lopuksi kokonaisvoima jaetaan kohtisuoriin komponentteihin.

### 6.1.2 NS-malli

Navier-Stokes -yhtälöiden avulla voidaan luoda fluidien mekaanisia ominaisuuksia mallintava NS-malli. Kolmiulotteisten fluidien mallintaminen NS-yhtälöiden avulla vaatii suurta laskutehoa eikä NS-yhtälöitä kannata käyttää kaikkien parametrien analysointiin. Aiemmissa tutkimuksissa (Bozkurtas et al. 2009) NS-yhtälöitä on yhdistelty POD:n (*Proper Orthogonal Decomposition*) kanssa mallin yksinkertaistamiseksi.

Tehokkain tapa mallintaa luonnossa esiintyviä ilmiöitä on yhdistää molempia yllä mainittuja lähestymistapoja. Artikkelissa NS-mallilla on kalibroitu BE-malli kuvaamaan räpyttelevän siiven rakennetta. Seuraavaksi BE-mallin avulla on tehty kattava tutkimus eri parametrien vaikutuksista. Tämän pohjalta on valittu parhaat vaihtoehdot, jotka on syötetty takaisin NS-malliin tarkemman ratkaisun saavuttamiseksi.

Artikkelissa esitelty simulaatio on suoritettu SIIB-metodilla (*Sharp-interface immersed boundary method*). SIIB-metodia on jatkettu MDG-metodilla (*Multi-dimensional ghost-cell method*), eli osa soluista on määritetty kiinteään aineeseen. MDG-metodin haamusolut on sijoitettu aina virtaavaa ainetta laskevan solun viereen. Mallin pääyhtälöt ovat kokoon puristumattoman viskoosisen fluidin Navier-Stokes yhtälöt. Yhtälöt ovat diskreettejä, solukeskeisiä ja kuvaavat nopeutta ja painetta. Solukeskeiset nopeudet täyttävät momenttiyhtälöiden ehdot.

## 6.2 Optimointi

Koska siiveniskut oletetaan harmonisiksi, voidaan ne optimoida kahdeksan parametrin avulla. Parametrit sijoitetaan geneettiseen algoritmiin ja simplex-optimointialgoritmiin siiven optimoimiseksi. Riippuen arviointikriteereistä, näillä työkaluilla siiven rakenteesta

voidaan tehdä alkuperäistä tehokkaampi. Algoritmit on rajoitettu tutkimaan vain lyöntitiheyksiä, jotka kiitäjä voi saavuttaa. Suuremmalla lyöntitaajuudella voitaisiin rakentaa huomattavasti tehokkaampia koneita, mutta taajuuden mukana kasvaa myös liikkeeseen vaadittava voima.

Geneettinen algoritmi luo ryhmän malleja, joilla on satunnaisesti valittuja parametrien arvoja. Näitä malleja arvioidaan valitulla kustannusfunktioilla. Tehokkaimman mallin pohjalta geneettinen algoritmi luo uuden ryhmän, josta valitaan jälleen paras. Sukupolvia luodaan, kunnes kustannusfunktion minimi on saavutettu. Sopivimmat mallit sijoitetaan NS-malliin, jonka avulla voidaan syvemmin tarkastella ja optimoida valittuja ominaisuuksia.

Koska kiitäjän siivenisku ei välttämättä ole liikkeenä tehokkain mahdollinen, on sitä pyritty optimoimaan monitarkkuusmallilla, joka hyödyntää BE-mallien yksinkertaisuutta ja NS-mallin tarkkuutta. Tässä mallissa siiveniskua on kuvattu yksinkertaisella harmonisella liikkeellä.

Monitarkkuusmallin optimoinnissa oletetaan molempien mallien tärkeimpien muuttujien tuloksien vastaavan toisiaan. Jos tämä oletus ei toteudu, voidaan karkeamallia käyttää parametrien optimointiin ja tarkempaa mallia valittujen parametrien tarkasteluun. Artikkelia varten BE-mallin simulaatio oli tehty 576 kertaa eri parametreilla. Simulaatioiden perusteella todettiin, että alkuperäinen, kiitäjän siivenisku, ei ole tehokkain mahdollinen tapaus. Rakenteen muutoksilla saadut hyödyt olivat kuitenkin marginaalisia: 7% lisä nosteen ja 12.5% kuormankantokykyyn.

Edellä mainituista 576 simulaatiosta valittiin 22 parasta NS-mallin simulaatioihin. Näistä 22 simulaatiosta huomattiin, että NS-malli ennustaa nosteen ja kuormankantokyvyn paremmin kuin BE-malli. Erot osoittautuvat kuitenkin pieniksi. Optimoinnin perusteella parametriotantaa laajentamalla voidaan luoda kiitäjän siiveniskua huomattavasti tehokkaampi liike.

### 6.3 Laskenta

Mallia tarkastellaan kolmiulotteisessa karteesisessa koordinaatistossa. Siivet on kiinnitetty runkoon, joka ajatellaan paikallaan pysyväksi muuttumattomaksi esineeksi. Koordinaatiston rajat on sijoitettu niin kauas rakenteesta, että ne eivät vaikuta laskentaan.

Simulaatioita tehtiin kolme. Ensimmäinen laskuverkko sisälsi 70% enemmän tarkastelupisteitä kuin lähtötilanteessa, toinen 50% vähemmän kuin lähtötilanteessa ja kolmas kaksi kertaa niin paljon kuin toinen. Simulaatiot 1 ja 2 erosivat lähtötilanteesta korkeimmillaan 1%. Kolmannen simulaation virhe oli 1% simulaatiosta 2.

Aluksi simulaatiot tutkivat neljää siiveniskua. Kuitenkin huomattiin kolmannen siiveniskun aikana siipiä ympäröivien pyörteiden vakiintuvan. Lopuissa laskuissa on käsitelty ainoastaan kahta viimeistä siiveniskua.

## 7. YHTEENVETO

Ensimmäisessä luvussa käsitellään erilaisia mallintamisen työkaluja ja käsitteitä. Esitellyt työkalut ja analyysimetodit luovat selkeän kuvan suunnitteluprosessista. Esitellyt matriisit, kuten suhteellinen herkkyysmatriisi, kuvaavat järjestelmän ominaisuuksia, parametreja ja näiden suhteita yksinkertaisesti, selkeästi ja tehokkaasti. Keskeisintä suunnittelu-prosessissa on tiedon kerääminen. Informaation tai raakadatan pohjalta voidaan määrittää järjestelmän tärkeimmät ominaisuudet, parametrit ja asiakkaan vaatimukset. Karkeamallinnuksessa näiden käsitteiden ymmärtäminen on keskeistä.

Luvussa 3 esitelty analyysityökalu hyödyntää luvun 2 menetelmiä. Niiden pohjalta syntyneellä ohjelmalla tuotteiden, ongelmien ja tapahtumien karkeamallintaminen on helppoa ja nopeaa, molemmat ominaisuuksia, joihin kyseisellä lähestymistavalla pyritään. Suunnitteluanalyysityökalulla saavutettava tarkkuus on riittävä, kun käyttäjä tunnistaa ongelman tärkeimmät muuttujat.

Luvuissa 4, 5 ja 6 käytettyjen karkeamallien hyödyt ovat selvät. Luvussa 4 lähestymistapojen erot näkyvät selkeästi. Karkeamallinnuksessa ymmärryksen lopputuotteesta ei tarvitse olla kovinkaan korkea. Luvussa 5 on esitelty verkostojen mallintamisen laskennallista monimutkaisuutta. Esitetty vaihtoehto binaarimallien korvaamiseksi vähentää monimutkaisuutta. Luvun 6 tilanteessa on käytetty erilaisia lähestymistapoja kokonaisen mallin luomiseen, siinä karkeamalli on vuorovaikutuksessa korkean tarkkuuden mallin kanssa, vastaavanlaisia monitarkkuusmalleja on hyödynnetty muissakin tutkimuksissa (Tangorra et al. 2010; Babaei et al. 2016). Luvuissa 4, 5 ja 6 selvitetään perusteellisesti karkeamallinnuksen hyödyt.

Korkean tarkkuuden mallit antavat todenmukaisempia tuloksia nopeammin kuin karkeamallit. Ne myös näyttävät usein viimeistellymmiltä ja käyttövalmiimmilta. Simulointi korkean tarkkuuden malleilla on tarkempaa, sillä ihmisen tekemän virheen mahdollisuus pienenee (Pernice 2016).

Karkeamallin lähestyminen asiakkaan näkökulmasta on helpompaa. Myyntitilanteessa asiakkaan on helpompi esittää omia ajatuksiaan malliin, joka ei vielä ole valmis, tällöin asiakkaan ja suunnittelijan välinen kommunikointi on kaksisuuntaista. Karkeamallien virheiden korjaaminen on helpompaa ja yksinkertaisesta mallista asiakas voi nähdä ne helpommin (Chen 2009).

Karkeamallinnus voi toimia erinomaisena työkaluna suunnitteluprosessin alkuvaiheessa, tai tilanteissa joissa ratkaisu tarvitaan nopeasti. Vaikka edellä on esitetty, että karkeamallien käyttäjän tietotaidon ei tarvitse olla yhtä korkea kuin korkean tarkkuuden malleissa,

tulee käyttäjän kuitenkin ymmärtää ja tunnistaa tuotteen tärkeimmät ominaisuudet, parametrit ja asiakkaan vaatimukset.

Tulevaisuudessa karkeamalleja voidaan hyödyntää yhdessä korkean tarkkuuden mallien kanssa ja projektien optimoinnissa. Karkeamallien käyttäminen yhdessä korkean tarkkuuden mallien kanssa mahdollistaa monien monimutkaistenkin tapahtumien tarkastelun. Suunnittelutyö on kallista ja mitä nopeammin tärkeimmät ominaisuudet saadaan vastaamaan asiakkaan vaatimuksia, sitä halvemmalla asiakas pääsee.

# LÄHTEET

Arola, T. (2018). Meluntorjuntaratkaisun parametrinen suunnittelumalli, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Saatavissa: [http://tut.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwjV07T8MwED4BXRA-MIEA8CsrI0iS187BHVFPVRd2QeCyRE7tSIPVA7f\\_fOxcoYupgD9bJPp3k-\\_z6PgNwFqeDfzlBFqrmplyyUEOeS5mJArMz57UsStMYOil4eWfz13w2E29bWrfGWUX\\_bDSx8y7GYGt0MtnoDySYcxH9SyETThO0i34ce42WKk7M3en-gaTxEs3A91L4DF5ASOHv9ccp\\_C3qI9g2xuOm9xg\\_uBNcltf6p25W1E0ttL-tXKGhutPC4nW-fQdKm6rj2HZDJ-Hk0HOES18blioeYaqETPqH69q4J3\\_AKOFb1Zty5w2\\_QlRCTdlwksxyLYEPft-GCS6brBBpaLK7jftvr3U1v4BBBP\\_Dq0rIPB-7Lm9sQq7vvyK0BheSBag](http://tut.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwjV07T8MwED4BXRA-MIEA8CsrI0iS187BHVFPVRd2QeCyRE7tSIPVA7f_fOxcoYupgD9bJPp3k-_z6PgNwFqeDfzlBFqrmplyyUEOeS5mJArMz57UsStMYOil4eWfz13w2E29bWrfGWUX_bDSx8y7GYGt0MtnoDySYcxH9SyETThO0i34ce42WKk7M3en-gaTxEs3A91L4DF5ASOHv9ccp_C3qI9g2xuOm9xg_uBNcltf6p25W1E0ttL-tXKGhutPC4nW-fQdKm6rj2HZDJ-Hk0HOES18blioeYaqETPqH69q4J3_AKOFb1Zty5w2_QlRCTdlwksxyLYEPft-GCS6brBBpaLK7jftvr3U1v4BBBP_Dq0rIPB-7Lm9sQq7vvyK0BheSBag).

Babae, H., Perdikaris, P., Chrysostomidis, C. & Karniadakis, G.E. (2016). Multi-fidelity modelling of mixed convection based on experimental correlations and numerical simulations, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 809, pp. 895-917.

Bozkurtas, M., Mittal, R., Dong, H., Lauder, R., G. V. & Madden, P. (2009). Low-dimensional models and performance scaling of a highly deformable fish pectoral fin, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 631, pp. 311-342.

Chen, A. (2009). Why low-fidelity prototyping kicks butt for customer-driven design, Saatavissa (19.12.2018): <https://andrewchen.co/why-every-consumer-internet-startup-should-do-more-low-fidelity-prototyping/>.

Díez Gutiérrez, A.J. (2014). Analysis and Optimization Tool for Engineering Design, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto Saatavissa: [http://tut.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwY2AQNTIz0EUrE0ATuFFGvhGmXI4WkYht2ynAXAO6RyNZr6S0RA8YmCIAR-hDzhfQB5apwNrd3MJSH1iFgc6LZAVt6wSmYl-ZnR29XD2BIUALbmgeuDNwEGXhckCaxhRiYUvNEGExhp3soAI1V8AdmxF-zoDkeF-kPz8HAVg21AB6ew\\_BRfwyglRBn031xBnD12gHfEQZ8aDTmlG1zCg\\_RfxcoFFg51nLMbAmwhalJ5XAt68liLBoJCUmJhkYppoZ-mFpkGZinALsbJqYm6cmWySZJicbJxsYSjJoEGu8FPFKpRm4gLW6CXg9k5kMA0tJUWmqLDiw5KBBBwDb9XfR](http://tut.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwY2AQNTIz0EUrE0ATuFFGvhGmXI4WkYht2ynAXAO6RyNZr6S0RA8YmCIAR-hDzhfQB5apwNrd3MJSH1iFgc6LZAVt6wSmYl-ZnR29XD2BIUALbmgeuDNwEGXhckCaxhRiYUvNEGExhp3soAI1V8AdmxF-zoDkeF-kPz8HAVg21AB6ew_BRfwyglRBn031xBnD12gHfEQZ8aDTmlG1zCg_RfxcoFFg51nLMbAmwhalJ5XAt68liLBoJCUmJhkYppoZ-mFpkGZinALsbJqYm6cmWySZJicbJxsYSjJoEGu8FPFKpRm4gLW6CXg9k5kMA0tJUWmqLDiw5KBBBwDb9XfR).

Ellman, A.U., Krus, P. & Jouppila, V. (2013). Comparison of low-and high-fidelity approach in model based design in the case of a portable motion platform,

Krus, P. (2010). Engineering Design Analysis and Synthesis, Linköping University, Department of Management and Engineering, Linköping,

Kurian, G.T. & Books24x7, I. (2014). The AMA dictionary of business and management, 1st ed. American Management Association, New York, NY,

Pernice, (2016), K. UX Prototypes: Low Fidelity vs. High Fidelity, Saatavissa (19.12.2018): <https://www.nngroup.com/articles/ux-prototype-hi-lo-fidelity/>.

Tangorra, J.L., Lauder, G.V., Hunter, I.W., Mittal, R., Madden, P.G.A. & Bozkurttas, M. (2010). The effect of fin ray flexural rigidity on the propulsive forces generated by a biorobotic fish pectoral fin, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 213(23), pp. 4043-4054.

Tovey, C.A. (2002). Tutorial on Computational Complexity, *Interfaces*, Vol. 32(3), pp. 30-61.

Yin, M. & Angus, J. (2008). On the cost of low-fidelity modeling: The case for a per-formability approach, 2008 Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE, pp. 295-300.

Zheng, L., Hedrick, T.L. & Mittal, R. (2013). A multi-fidelity modelling approach for evaluation and optimization of wing stroke aerodynamics in flapping flight, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 721, pp. 118-154.